

**INITIATION AU
CALCUL ELECTRONIQUE**

LES SUPRACONDUCTEURS

EN 1911, le physicien hollandais Heike Kamerling Onnes, poursuivant des recherches sur les propriétés de la matière au voisinage du zéro absolu (-273°C) découvrit qu'au-dessous d'une température très voisine de celle de l'ébullition de l'hélium, la résistance électrique du mercure devenait nulle.

Onnes comprit qu'il était en présence d'un nouvel état de la matière, qu'il baptisa SUPRA-CONDUCTIVITE, appelant température critique, la température à laquelle apparaissait le phénomène.

L'état supraconducteur est caractérisé par une résistance pratiquement nulle au passage du courant électrique : ce qui signifie que si l'on déplace un anneau supraconducteur dans un champ magnétique, un courant induit s'y crée — c'est la loi classique de Lenz — mais ce courant va tourner, sans décroître en intensité, et sans subir le moindre amortissement. Ainsi, il y a quelques années, dans un laboratoire du Massachusetts Institute of Technology, on a lancé, dans un tore de plomb, immergé dans un bain d'hélium liquide à $4,2^{\circ}\text{K}^*$, un courant de

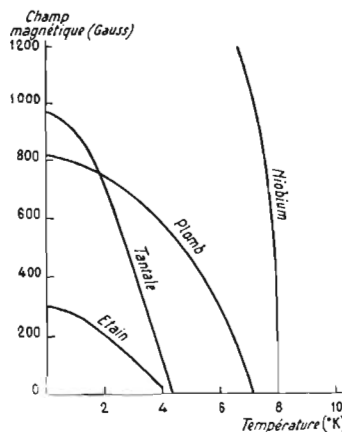


Fig. 2. — Effet de la température : la supraconductivité apparaît au-dessous des courbes critiques.

40 A ; pendant deux ans, le courant a tourné dans l'anneau. Périodiquement, on mesurait son intensité en lui faisant induire un courant dans un circuit de mesure ; le seul amortissement constaté correspondait à la quantité d'énergie prélevée au cours de la mesure.

LES DEBUTS DE L'ORDINATEUR CRYOGENIQUE : 1955

C'est en 1955 que D. Buck a proposé de réaliser les principaux organes internes d'un calculateur en faisant appel aux propriétés des supraconducteurs. A l'appui de cette proposition, Buck avait démontré expérimentalement la possibilité d'effectuer toutes les opérations essentielles de logique et de mémoire au moyen d'un dispositif qu'il avait baptisé « cryotron ».

Le premier cryotron était constitué par une tige de tantale de quelques millimètres de longueur et de $0,025\text{ mm}$ de diamètre, entourée par un bobinage de fil de niobium de $0,0075\text{ mm}$ de dia-

mètre. L'ensemble était plongé dans un bain d'hélium liquide à une température de l'ordre de $4,2^{\circ}\text{K}$. Or si l'on se rapporte à une table donnant les températures critiques des supraconducteurs, on constate que le niobium est supraconducteur à partir de $8,7^{\circ}\text{K}$, tandis que le tantale ne l'est qu'à partir de $4,4^{\circ}\text{K}$: il suffit alors d'appliquer un champ magnétique très faible pour faire réapparaître la résistance du tantale. C'est que en effet la supra-

conductivité n'apparaît que pour une certaine gamme de valeurs de la température ambiante et du champ magnétique ambiant. Passées certaines valeurs critiques pour le champ magnétique, la supraconductivité disparaît (Fig. 1 et 2).

Or on peut, dans le cas présent, produire un tel champ en faisant passer un courant dans le fil de niobium ; on arrête alors le courant dans le fil de tantale, redevenu normal, c'est-à-dire ré-

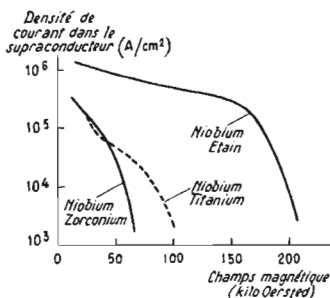


Fig. 1. — Variation de la supraconductivité avec le champ magnétique et la température ambiante : en dessous des courbes « critiques », la supraconductivité fait son apparition. Il existe une courbe critique par alliage.

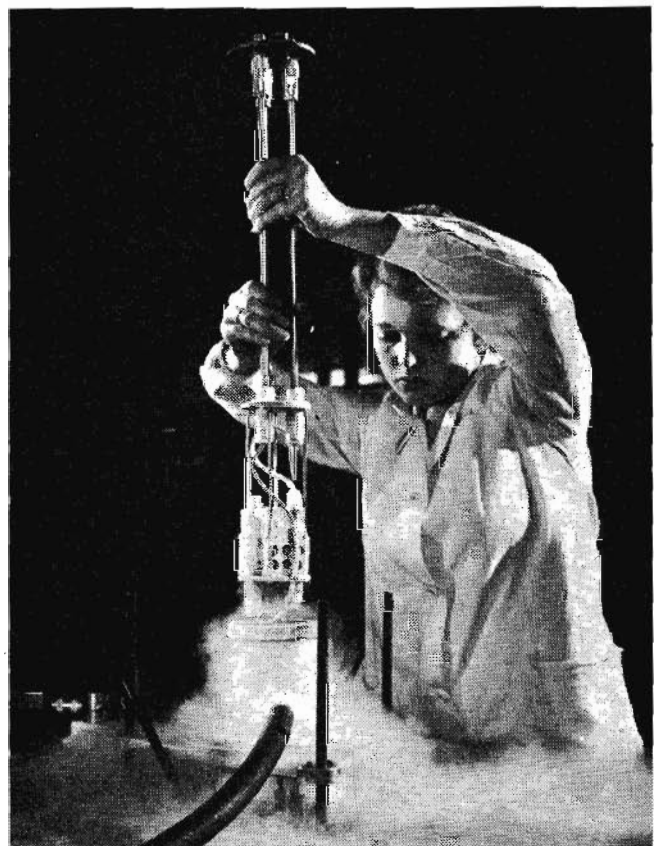


Photo 1. — Les mémoires cryogéniques sont petites, très rapides et leur fabrication ne pose aucun problème. Leur in-

convénient majeur : elles ont besoin de très grands froids !

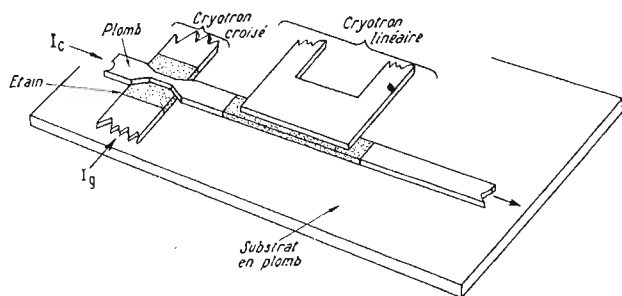


Fig. 3. - Cryotrons.

sistif. On vient de fabriquer un relais très simple... encore faut-il disposer d'hélium liquide !

Il est possible dès lors d'envisager des ensembles de cryotrons remplissant des fonctions complexes. Par exemple, le courant qui traverse le fil de tantale peut ensuite passer dans le bobinage de niobium d'un second cryotron : de sorte qu'un cryotron peut en commander un autre et ainsi de suite.

LOGIQUE A CRYOTRONS

Pratiquement, la cellule de base du cryotron comporte deux conducteurs en couche mince. L'un pilote l'autre, en le faisant basculer entre l'état normal, résistif, et l'état supraconducteur, sous l'action du champ magnétique engendré par un courant de commande.

Le cryotron croisé est constitué d'un conducteur en étain, placé en sandwich entre un substrat diamagnétique en plomb et un conducteur en plomb. L'étain, supraconducteur, peut redevenir résistif, soit en le faisant traverser par un courant, soit en envoyant un courant électrique dans le conducteur de plomb (Fig. 3).

Le croisement des conducteurs peut ne pas se faire à angle droit : le cryotron linéaire en est un exemple ; ses caractéristiques présentent une certaine dissymétrie sur celles du cryotron croisé, à cause essentiellement des compositions vectorielles différentes dans les deux cas.

Les films métalliques employés ont une épaisseur variant entre 0,3 et 1 micron, et leur largeur atteint 25 microns, sinon plus.

La présence d'un courant dans le conducteur de commande engendre donc un champ magnéti-

que qui rend normal (donc résistif) un matériau supraconducteur. Ceci se traduit logiquement par la constatation suivante : si on applique un signal logique A sur un

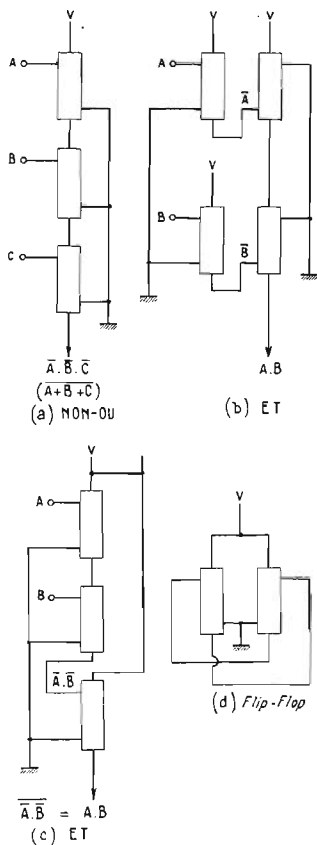


Fig. 5

cryotron, le cryotron le transforme en un signal A. En effet, rappelons-nous les définitions de l'algèbre de Boole (voir *Le Haut-Parleur* n° 1211, pages 90/93) : Si on applique une tension électrique aux bornes d'un supraconducteur, on observe la présence d'un courant. La présence d'un signal à l'entrée du cryotron peut se traduire par une équation logique $I = 1$. S'il n'y avait pas de courant, on écrirait simplement $I = 0$. Le 1 et le 0 sont des repères logiques : $I = 1$ signifie que le courant a une valeur élevée, sans précision sur la valeur nulle du courant ; $I = 0$ signifie que l'intensité du courant est faible.

Si $I = 1$ à l'entrée, le cryotron devient résistif : à la sortie le niveau de courant est bas ; on a donc à la sortie $I = 0$. Si à l'entrée $I = 0$, le cryotron reste supraconducteur et le courant qui traverse le conducteur d'étain a un niveau élevé : à la sortie on a $I = 1$.

Le cryotron est donc un circuit de complémentation logique (Fig. 4). En associant plusieurs cryotrons en série ou en parallèle, on réalise alors les fonctions logiques les plus diverses (Fig. 5). On peut même fabriquer un montage en bascule pour constituer une mémoire binaire : le courant fourni par la source d'alimentation se subdivise en deux voies, dont chacune comprend le conducteur de l'un des deux cryotrons et le

bien dans l'avenir fabriquer par des méthodes analogues à celles employées pour la fabrication des supercircuits intégrés. La première mémoire prototype de R. A. Gange, avait une densité de 1010 boucles par centimètre carré ; la seconde version voyait sa capacité doublée et l'on envisage maintenant très sérieusement d'élargir le système et de passer directement aux mémoires de masse supraconductrices - contenant quelques milliards de bits !

La cellule de base (Fig. 6) consiste en quatre couches minces métalliques déposées sur un substrat en verre. La première couche, déposée à même le substrat, est le plan de base en plomb, dans lequel un trou a été usiné par des méthodes chimiques. Suivent

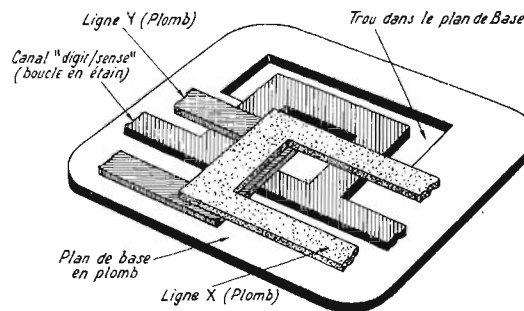


Fig. 6. - Cellule de mémoire supraconductrice.

conducteur de commande (le second conducteur) de l'autre cryotron. Le système possède deux états stables, dans chacun desquels l'une des voies est conductrice, l'autre bloquée.

LES CRYOMEMOIRES

Ce principe a été développé, principalement aux Etats-Unis, et notamment par Robert A. Gange - de la R.C.A. - qui a mis au point une cellule à boucle supraconductrice, que l'on pourrait très

une couche isolante, un conducteur en couche mince d'étain, passant au-dessus du trou et deux canaux en plomb. Chaque conducteur est séparé de son voisin par une couche isolante.

L'inductance du conducteur boucle est plus élevée au niveau du trou. C'est ce qui va permettre de mettre en mémoire des informations binaires.

Les canaux X et Y sont alimentés par une impulsion de courant, qui rend résistif une portion de la boucle (Fig. 7). On envoie

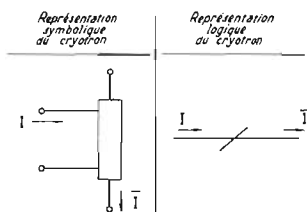


Fig. 4. - Le cryotron est un inverseur logique.

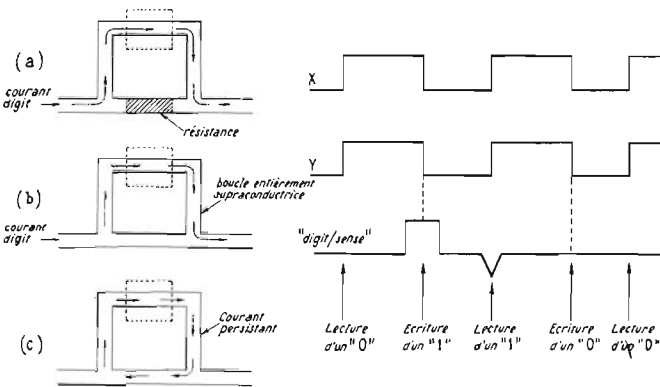


Fig. 7. - Fonctionnement de la cellule de mémoire à boucle.

à ce moment un courant « digit » dans la boucle, qui prend donc le chemin le moins résistif — qui est en même temps celui à inductance la plus élevée — Quand les canaux X et Y ne sont plus excités, la supraconductivité réapparaît dans la boucle et le courant digit induit un courant persistant dans la boucle.

Pour lire une telle mémoire, et donc détecter la présence — ou l'absence — d'un courant persistant dans une boucle, il suffit d'envoyer une impulsion simultanément dans les lignes X et Y. La lecture s'effectue au moment de l'arrivée des impulsions au-dessus de la cellule : une impulsion est induite dans la ligne « digit/sense » par le courant persistant passant au-dessus du trou.

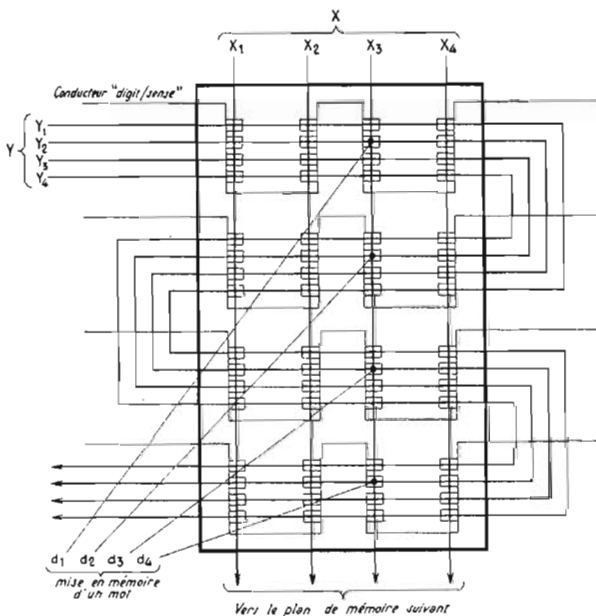


Fig. 8. — Plan de mémoire contenant 16 mots de 4 bits chacun.

La lecture et l'écriture utilisent donc l'inductance de la boucle : on crée un champ magnétique suffisamment intense pour créer un flux magnétique dans le canal « sense/digit » (Fig. 8). Le passage d'une impulsion dans les lignes X et Y engendre une brusque variation de ce flux ce qui induit en conséquence un courant d'écriture ou de lecture selon le cas considéré.

Partant de ces principes, R. A. Gange a conçu un système hybride : les canaux X sont interconnectés en série entre plans. Une cellule élémentaire de mémoire se situe au niveau de l'intersection de deux canaux X et Y. Chaque canal Y recoupe plusieurs fois chaque canal X et le nombre de digits binaires par mot de mémoire est égal au nombre d'in-

tersections d'un canal X donné avec un canal Y donné (Fig. 8).

Pour fabriquer de très grosses mémoires, il est nécessaire de fabriquer des plans de mémoire suffisamment denses. Cependant, le nombre des interconnexions augmentant, le rendement de la fabrication des plans de mémoire diminue, de sorte qu'un compromis s'avère nécessaire pour satisfaire les deux besoins complémentaires : forte densité, rendement de fabrication élevé. Une analyse d'optimisation des prix de revient a montré qu'il fallait construire des plans de 250 000 bits. Dans l'avenir, de tels plans de mémoire seront standardisés. 512 plans standards, travaillent à 3,5 °K, arriveront à stocker jusqu'à 100 millions de bits.

MEMOIRES CRYOGENIQUES : COMPACTES ET RAPIDES

L'industrie des ordinateurs recherche des mémoires plus rapides et moins chères. Elle pourra trouver dans les cryomémoires une solution à son problème (Fig. 9).

En effet les tores magnétiques sont trop chers et trop volumineux pour constituer une mémoire de 100 millions de bits ; les disques, tambours, cartes ou bandes magnétiques sont d'un accès trop lent ; quant aux semi-conducteurs, leur prix de revient n'est guère abordable pour les grosses mémoires.

Seulement, il reste un problème : les mémoires cryogéniques ont besoin d'hélium liquide, pour travailler à 4,2 °K, au plus, c'est-à-dire à la température de liquéfac-

tion de l'hélium. Or la production de grands poids coûte encore trop cher et l'avenir des cryomémoires est lié essentiellement à la rentabilité : tant que l'on ne saura pas faire du froid à bon marché, les cryomémoires resteront une simple curiosité de laboratoire. D'autres technologies évoluent très rapidement : c'est le cas des hologrammes, qui sont capables de constituer également de très grosses mémoires de masse, et qui, eux, n'ont guère besoin du froid. C'est un très fort atout à leur avantage.

L'ATOUT DE LA CRYOGENIE : L'EFFET JOSEPHSON

La découverte de l'effet Josephson a donné un très fort avantage aux cryomémoires. En 1962, un tout jeune physicien britannique, B. D. Josephson, publiait un article dans lequel il faisait état de conclusions assez surprenantes qu'il tirait d'une analyse purement théorique des phénomènes de supraconductivité.

Josephson trouva en effet qu'un courant supraconducteur pouvait franchir une fine couche de matière non supraconductrice, sans dissipation de chaleur dans la couche non supraconductrice : Un courant pouvant s'élever à quelques milliampères peut s'écouler, sans chute de potentiel dans la barrière ; celle-ci se comporte comme si elle était supraconductrice, alors qu'elle ne l'est pas ! De plus, l'intensité de ce courant — de ce supercourant — varie périodiquement lorsque le champ magnétique augmente.

L'effet Josephson présente une autre particularité : lorsque l'on applique une tension électrique aux bornes d'une diode « Josephson » (c'est-à-dire une couche isolante séparant deux supraconducteurs), un supercourant alternatif circule dans la barrière et sa fréquence est proportionnelle à la tension appliquée ; le coefficient de proportionnalité est égal à 483,6 MHz par μV . Comme les tensions de polarisation sont de l'ordre du millivolt, la fréquence du supercourant peut atteindre 10^{12} à 10^{13} Hz.

Pratiquement, on peut remplacer les cryotrons par des diodes « Josephson » — on dit encore des cryotrons tunnel à cause de l'effet tunnel prenant naissance dans la barrière isolante (Fig. 10). Leur

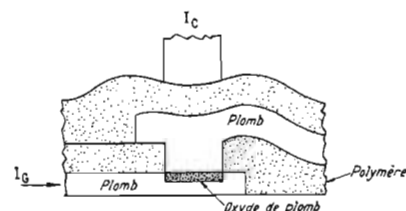


Fig. 10. — Cryotron tunnel. Caractéristique : les points de fonctionnement sont marqués A et B.

avantage sur les cryotrons classiques tient au fait qu'ils sont beaucoup plus rapides à basculer d'un état A à un état B : quelques dizaines de picosecondes seulement.

L'Air Liquide, qui, dans son centre de Sassenage, près de Grenoble, poursuit des études sur l'effet Josephson a remplacé la couche isolante d'oxyde par un

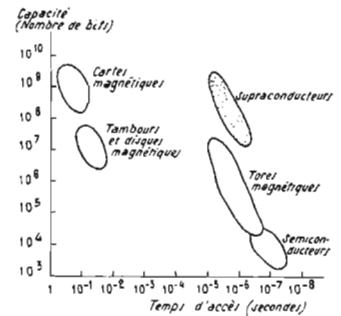


Fig. 9. — Les performances des mémoires en supraconducteurs surpassent celles de toutes les autres mémoires.

semi-conducteur (le Tellure) : on obtient ainsi des épaisseurs de barrière dix fois plus importantes (100 à 1 000 Angströms* contre 10 à 20 Angströms* dans les diodes Josephson à oxyde). De telles jonctions « épaisses » sont beaucoup plus faibles que les jonctions Josephson « classiques » à oxyde.

C'est une première mondiale certes, un atout supplémentaire pour les cryomémoires, mais cependant l'intérêt en reste limité. Les diodes Josephson ont besoin du froid et d'hélium liquide.

Fascinantes, les mémoires supraconductrices ne sont peut-être cependant pas prêtes à sortir des laboratoires. Aux frigoristes de prouver le contraire...

Marc FERRETTI

* Rappelons comment s'effectue la conversion entre les températures absolues T (qui s'expriment en degrés Kelvin) et les températures centigrades t (qui s'évaluent en degrés Celsius) :

$$t = T - 273$$

Ainsi à la température centigrade de $-273^{\circ}C$ correspond le zéro absolu.

* L'Angström (en abrégé : Å) représente la dix-millième partie du micron, soit :

$$1 \text{ Å} = 10^{-4} \mu = 10^{-10} \text{ m}$$

